

Результаты исследования возможности замены набора GIA GemSet, предназначенного для оценки цвета драгоценных камней, цифровыми мерами-имитаторами для автоматизированных систем контроля

А.С. Кушкочева¹, А.Н. Чертов¹, Е. В. Горбунова¹, С. В. Веселов¹

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Кронверкский проспект 49, Санкт-Петербург, Россия, 197101

Аннотация. В настоящее время оценка качества драгоценных камней осуществляется органолептическим методом. Для идентификации их окраски в качестве эталонных образцов цвета эксперты используют набор мер-имитаторов GIA GemSet, изготовленных из прозрачного акрил-пластика – полимера с высоким коэффициентом преломления, и с собственным цветовым пространством GIA. Авторами проведены исследования оптических характеристик набора GIA GemSet с целью изучения возможности замены физических эталонов на цифровые меры-имитаторы для автоматизированных систем контроля. Исследования проводились двумя методами: спектральным и технического зрения. Спектральные измерения проводились с помощью оптоволоконного спектрометра USB4000. Для определения цветовых характеристик по цифровым изображениям использовался аппаратно-программный комплекс собственной разработки. По результатам исследований построено цветовое дело набора GIA GemSet для случая стандартного источника D65, дающее визуальное представление о характеристиках набора. Установлено соответствие между координатами цвета образцов, полученных двумя указанными методами, что подтверждает возможность автоматизации процесса оценки цвета драгоценных камней.

1. Введение

В настоящее время в Российской Федерации для оценки цвета драгоценных камней (ДК) используются три атласа: атлас Gemological Institute of America (GIA) и соответствующие наборы эталонов цвета GIA GemSet; набор цветных мер-имитаторов ДК, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений № 20855-01 от 20.12.2000 г. (далее – набор мер-имитаторов из Госреестра СИ) [1]; набор цветных карточек World of Color производства GemGuide, воспроизводящий возможные цвета ДК аналогично цветовой системе Манселла.

Атлас GIA физически реализован в виде наборов эталонных образцов GIA GemSet: полного (GIA GemSet Hue Set), содержащего 324 образца, и усечённого (GIA GemSet Hue Wheel Version), содержащего всего 50 образцов. Код цвета по GIA содержит обозначения трёх компонентов: тон, светлота и насыщенность. Основным недостатком цветового атласа GIA и эталонов GemSet является то, что на них не существует никаких количественных данных, и, следовательно, они предназначены исключительно для оценки цвета ДК экспертом на

основании визуального сравнения. Тем не менее, эталоны GIA GemSet могут быть оцифрованы и стать основой аналогового, но уже цифрового классификатора цвета ДК.

Набор цветных мер-имитаторов ДК содержит 50 образцов (31 образец для описания оттенка, 7 образцов для описания тона и 12 образцов для описания насыщенности), изготовленных по технической документации GIA GemSet (GIA Gem Instruments, США). Для описания цвета используется та же терминология, что и у атласа GIA. По сути, набор мер-имитаторов из Госреестра СИ представляет собой усечённый атлас GIA (GIA GemSet Hue Wheel Version). Атлас содержит не только физические меры-имитаторы ДК, но и их координаты цвета и цветности в колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. для двух стандартных источников освещения (источник типа А и источник типа С). Таким образом, теоретически данный атлас может быть использован для реализации количественного анализа.

2. Материалы

Для экспериментального исследования был использован набор GIA GemSet, который содержит 50 образцов (31 оттенок, 2 набора по 6 насыщенностей, и 7 тонов)

3. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились в 2 этапа:

1. Измерение спектров плоской и ограненной частей образцов набора GIA GemSet с помощью малогабаритного оптоволоконного спектрометра USB-4000.
2. Измерение плоской и ограненной частей образцов набора GIA GemSet с помощью аппаратно-программного комплекса для автоматизированной оценки качества цветных камней (далее – АПК), представленного на Рисунке 1.



Рисунок 1. Аппаратно-программный комплекс: 1 – верхняя подсветка, 2 – камера с объективом, 3 – кассета для размещения образцов анализа, 4 – светорассеивающая пластина, 5 – нижняя подсветка.

АПК основан на принципах технического зрения и обработки изображений. Предусмотрена работа в двух режимах: на отражение и на пропускание.

Перед каждым циклом измерений проводится калибровка АПК в два этапа. Калибровка по равномерному белому фону позволяет компенсировать неравномерность освещенности зоны анализа и влияние полевых aberrаций объектива. Проведение фотометрической калибровки по эталону белого обеспечивает достоверность воспроизведения цветовых оттенков на полученных изображениях, с учетом спектральных характеристик излучения источников и спектральных характеристик чувствительности каналов цветности камеры.

4. Результаты экспериментальных исследований

4.1 Спектральные измерения

Полученные спектральные характеристики образцов набора GIA GemSet представлены на рисунке 2.

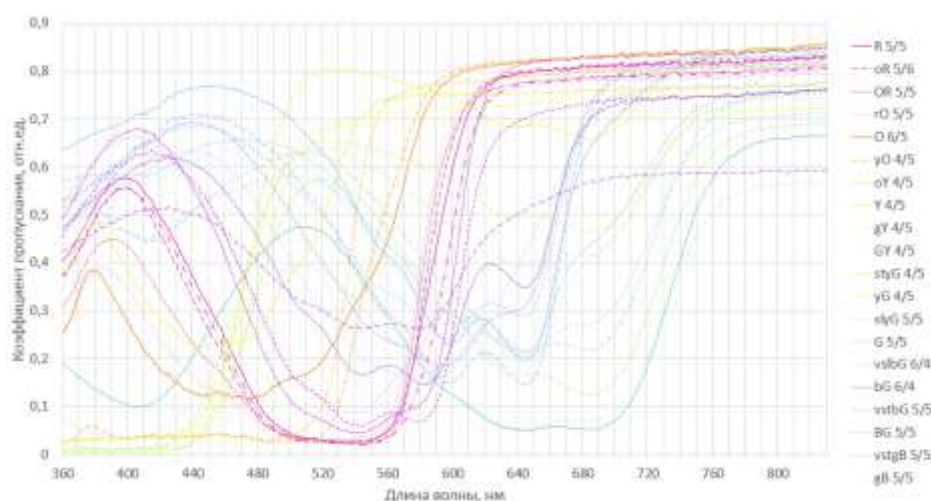


Рисунок 2. Спектральные распределения коэффициентов пропускания плоских частей элементов набора GIA GemSet (толщина 2 мм) в видимой области спектра.

Спектры измерены у плоских частей образцов набора для выявления свойств материала и дальнейшей возможности моделирования спектральных свойств пропускания ограненных частей. Поскольку при огранке увеличивается оптический путь луча в материале, то моделирование оптических свойств ограненной части сводилось к моделированию изменений спектральных характеристик при увеличении толщины материала. Пример результатов моделирования спектров пропускания при увеличении толщины до 10 мм представлены на рисунке 3.

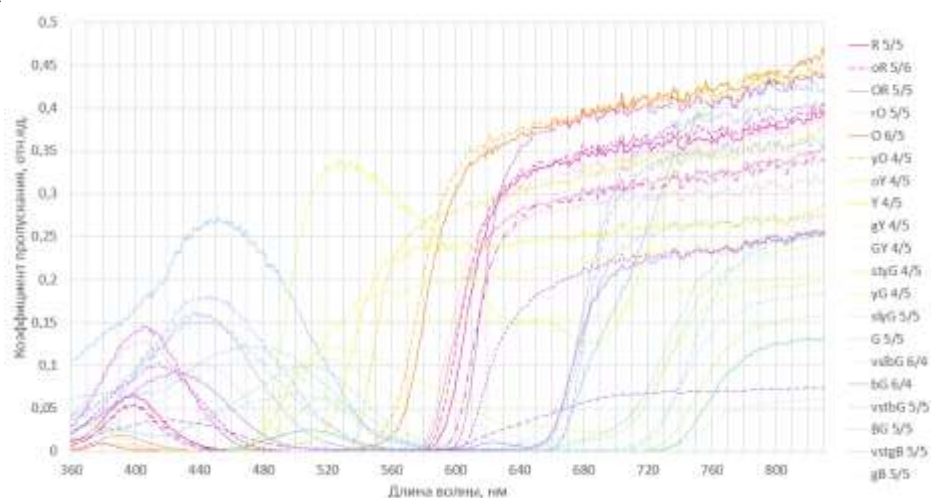


Рисунок 3. Спектральные распределения коэффициентов пропускания плоских частей элементов набора GIA GemSet (толщина 10 мм).

Спектры рассчитаны на основании закона изменения спектрального коэффициента пропускания и оптической плотности в зависимости от толщины. При этом, для однородного прозрачного объекта коэффициент пропускания (τ) определяется отношением пропущенного излучения (P_t) к величине падающего на объект излучения (P_0)

$$\tau = \frac{P_t}{P_0}.$$

Кроме того, коэффициент пропускания однородного прозрачного объекта может быть описан при помощи показателя поглощения (k_λ), не зависящего от толщины объекта и описывающего свойство материала объекта

$$\tau = \exp\{-d \cdot k_\lambda\},$$

где d – толщина объекта.

Пусть известен коэффициент пропускания однородного прозрачного объекта (τ_1) при толщине (d_1)

$$\tau_1 = \exp\{-d_1 \cdot k_\lambda\}.$$

Тогда показатель поглощения можно рассчитать по следующей формуле

$$k_\lambda = \frac{1}{d_1} \ln\left(\frac{1}{\tau_1}\right).$$

Следовательно, можно вывести формулу для расчета коэффициента пропускания (τ_2) объекта из того же прозрачного материала, но при толщине (d_2)

$$\tau_2 = \exp\left\{-\frac{d_2}{d_1} \cdot \ln\left(\frac{1}{\tau_1}\right)\right\} = \tau_1^{d_2/d_1}.$$

На рисунке 4 представлен результат моделирования цветового тела набора GIA GemSet, полученный на основании расчета цветовых координат, исходя из полученных ранее спектральных распределений коэффициентов отражения при различных толщинах и использовании в качестве источника подсветки эталонного источника излучения D65.

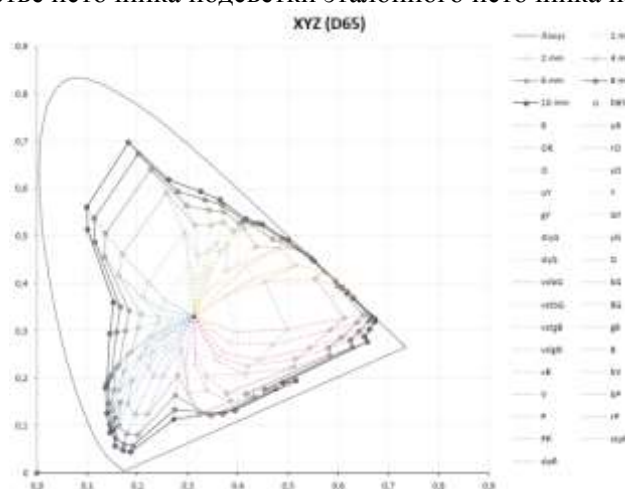


Рисунок 4. Цветовое тело набора GIA GemSet.

Координаты цвета \bar{X} , \bar{Y} и \bar{Z} однородного прозрачного объекта рассчитывались в соответствии с классическими правилами колориметрии

$$\begin{cases} k_c = \frac{100}{\sum_1^n P(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda} \\ \bar{X} = k_c \cdot \sum_1^n P(\lambda_i) \cdot \tau(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda, \\ \bar{Y} = k_c \cdot \sum_1^n P(\lambda_i) \cdot \tau(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\ \bar{Z} = k_c \cdot \sum_1^n P(\lambda_i) \cdot \tau(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \end{cases}$$

где $P(\lambda_i)$ – спектральное распределение излучения источника D65, воспроизводящего условия освещения усредненным дневным светом; $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$ и $\bar{z}(\lambda_i)$ – кривые сложения цветов в системе $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ измерения цвета по рекомендациям Международной Комиссии по Освещению 1931г; $\Delta\lambda$ – шаг по длинам волн.

По рассчитанным значениям координат цвета \bar{X} , \bar{Y} и \bar{Z} были получены значения координат цветностей

$$x = \frac{\bar{X}}{\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}}$$

и

$$y = \frac{\bar{Y}}{\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}}.$$

По полученным значениям координат цвета и координат цветностей можно построить цветовое тело, воспроизводимое элементами набора GIA GemSet.

Для реализации сравнения полученных данных с результатами измерений на АПК полученные координаты цвета в цветовом пространстве XYZ были пересчитаны по классической методике в координаты цвета в пространстве HLS [2].

4.2 Измерения на АПК

В ходе измерений при помощи АПК были получены изображения для плоской и ограненной частей образцов набора GIA GemSet и рассчитаны их координаты цвета в цветовом пространстве HLS (цветовой тон, светлота и насыщенность) – цветовом пространстве, в котором цвет описывается аналогично цветовому атласу Манселла, в соответствии с которым создавался набор GIA GemSet. Результаты представлены на рисунке 5.

































Центр				Блик				Код цвета
H	L	S	Из-е	H	L	S	Из-е	
345	26	91		348	32	75		R 5/5
350	27	92		353	33	83		oR 5/6
355	30	88		359	39	79		OR 5/5
0	30	94		3	41	80		ro 5/5
16	39	99		18	44	99		O 5/5
16	35	99		17	40	99		yO 4/5
28	41	99		29	49	99		oY 4/5
40	46	92		56	67	99		Y 4/5
52	45	96		56	51	99		gY 4/5
56	45	84		56	54	99		YG 4/5
65	41	82		64	50	99		styG 4/5
73	42	72		70	50	99		yG 4/5
85	40	61		84	55	99		slyG 5/5
99	32	69		98	39	67		G 5/5
149	24	58		147	31	48		vsIbG 6/4
161	23	60		159	28	52		bG 6/4

Рисунок 5. Изображения набора GIA GemSet, полученные на АПК.

При этом, как видно из Рисунка 5, с помощью АПК были получены изображения образцов набора GIA GemSet в условиях освещения равномерным световым потоком при наличии и отсутствии блика на поверхности образцов. Данный эффект был учтен при обработке изображений. Полученные изображения передавались в персональный компьютер, где обрабатывались при помощи разработанных алгоритмов определения цвета.

4.3 Сравнение результатов, полученных спектральным методом и на АПК

На рисунке 6 приведены результаты сравнения результатов расчета цветовых координат плоской и ограненной частей элементов набора GIA GemSet, полученных в ходе спектральных измерений и измерений при помощи АПК «ОКО», на примере координаты цветового тона (H) системы измерения цвета HLS.

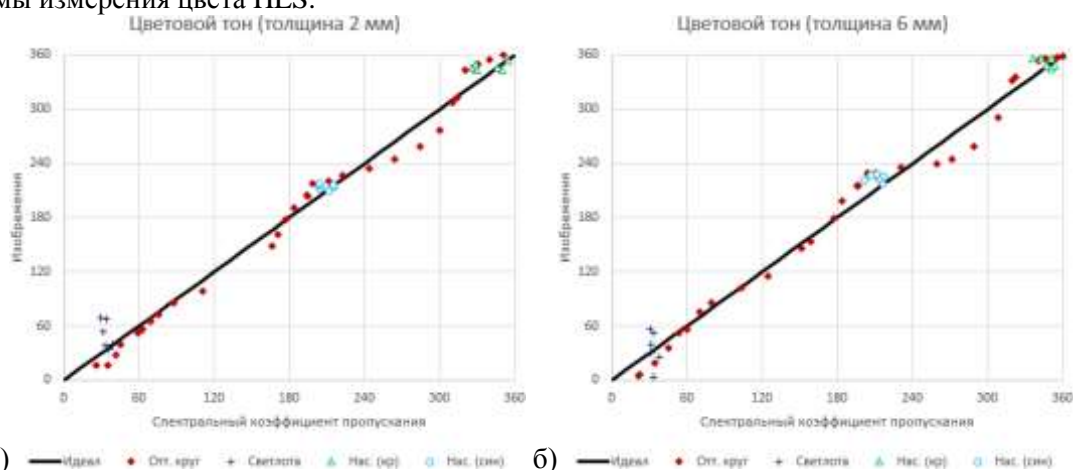


Рисунок 6. Сравнение координат цветового тона набора GIA GemSet, полученных при помощи спектральных коэффициентов пропускания и изображения (АПК «ОКО») для: а) толщины 2 мм (плоская часть элементов набора GIA GemSet); б) толщины 6 мм (ограненная часть набора набора GIA GemSet).

Из рисунка видно, что полученные результаты имеют высокую сходимость для всех элементов набора GIA GemSet – оттеночного круга (31 элемент), ряда светлоты (7 элементов) и двух рядов насыщенностей для красного (6 элементов) и синего (6 элементов) оттенков – вне зависимости от того, какая часть элемента набора GIA GemSet анализируется (плоская или ограненная). Максимальная ошибка составляет 8,3%. Поэтому можно сделать вывод о том, что замена набора GIA GemSet, предназначенного для оценки цвета драгоценных камней, цифровыми мерами-имитаторами для автоматизированных систем контроля не просто возможна, но эффективна.

5. Заключение

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности использования цифровых мер-имитаторов цвета (в виде наборов цветовых координат) вместо деградирующих со временем образцов набора GIA GemSet.

Кроме того, установлено, что с помощью разработанного авторами АПК возможно заменить визуальный анализ инструментальной оценкой.

6. Литература

- [1] СИ №20855-01, Набор цветных мер-имитаторов драгоценных камней, 08.05.2018.
- [2] Горбунова, Е.В. Колориметрия источников излучения / Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов // Расчет цветовых координат из спектральных свойств источников излучения, 2015. – С. 56-64.

The results of the study of the opportunity of replacing the GIA GemSet, designed to assess the color of precious stones, with digital imitation measures for automated control systems

A.S. Kushkoeva¹, A.N. Chertov¹, E.V. Gorbunova¹, S.V. Veselov¹

¹Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), Kronverksky prospect 49, St. Petersburg, Russia, 197101

Abstract. Currently, the quality assessment of precious stones is carried out by the organoleptic method. To identify their color, experts use a GIA GemSet (a set of gauges made of transparent acrylic plastic, a polymer with a high refractive index and with its own GIA color space) as reference color samples. The authors studied the optical characteristics of the GIA GemSet to study the possibility of replacing physical standards with digital measures-simulators for automated control systems. The studies were carried out by two methods: spectral and technical vision. Spectral measurements were performed using a USB4000 fiber optic spectrometer. To determine the color characteristics from digital images, a proprietary hardware-software complex was used. Based on the results of the research, the color business of the GIA GemSet set was constructed for the case of a standard source D65, giving a visual representation of the characteristics of the set. A correspondence was established between the color coordinates of the samples obtained by the two indicated methods, which confirms the possibility of automating the process of evaluating the color of precious stones.